

大型シミュレーション研究

「ファインマン振幅の自動計算と高エネルギー実験解析への応用」

実施報告書

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 栗原良将

課題番号：大型135

1. 研究組織

代表者： 栗原良将 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助手

メンバー： 黒田 正明 明治学院大学 法学部・教授

加藤 潔 工学院大学 工学部・教授

金子 敏明 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター・教授

藤本 順平 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助手

湯浅富久子 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター・助教授

石川 正 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター・助教授

2. 研究成果の総説

高エネルギー物理学においては、近年の精密測定実験により電弱相互作用と強い相互作用を記述する標準理論が高い精度で検証されている。当該研究では、標準理論の中で唯一直接に確認されていない Higgs 粒子の存在を確定し、その性質を詳細に調べるために必要な理論的予測を行った。さらに、標準理論を越える理論の候補(超対称性理論等)に対して、エネルギー・フロンティアにおける実験的検証が計画されており、ヨーロッパでは陽子・陽子衝突型加速器 LHC が建設中であり、2007 年の実験開始に向けて準備が進められている。また、より精密な実験的検証を行うために、世界中の高エネルギー物理学研究者の密接な協力のもとに電子・陽電子衝突実験である ILC(国際線形衝突型加速器)実験計画が進められている。これらについても詳細で定量的な理論的研究を展開した。

上記の TeV エネルギー領域における衝突型実験の特徴は、期待される信号プロセスが不可

避的に多重粒子生成反応となることと、この信号プロセスの散乱断面積がバックグラウンド・プロセスに比べて小さい(S/N が悪い), ということである。つまり, 膨大なバックグラウンドに対して, 信号はより複雑化し特定が困難になる傾向にある。このような条件のもとで, 目指す信号の検出能力を高め, さらに理論に含まれるパラメーターの精密な決定を行うためにはファインマン図を用いた摂動計算が不可欠である。しかし, 反応過程の複雑化及び, 反応数の増大化に伴い手計算による計算の実行は不可能となり, 大型計算機による遂行が不可欠となってきた。本研究により将来のコライダー実験のための数値解析手法が開発され, 信号・バックグラウンド双方に対して必要な散乱断面積を必要な精度で計算した。

2-1 LHC 実験のための QCD 高次補正を含むイベントジェネレータの開発

陽子・(反)陽子衝突散乱の実験解析に必要なイベント・ジェネレータを作成するための基礎的な数値解析法の開発を行った。特に, 強い相互作用(QCD)に関わる部分において, いくつかの数値解析法の進展があった。

ツリー近似のQCDプロセスの散乱振幅に関しては, 終状態6体反応までを数値化することが可能となった。また, 陽子を構成する複数のパートンを同時に扱い必要な陽子・(反)陽子散乱における多重ジェット生成反応のシミュレーション・データを作成することが可能なプログラム(`gr@ppa`)を開発した。高次補正を含む散乱振幅の数値化に関しては, 必要なループ補正の一部を(紫外発散を繰り込んだ後で)実効頂点関数(effective vertex)として自動生成するシステムの開発を行った。それ以外のループ補正は, ヘリシティ振幅に基づく数値化を行うが, その際に必要なループ積分に関して, 超幾何関数を用いた簡潔な公式を用意し, 数値化するプログラムの開発を行った。

実際の高次補正を含む散乱断面積の計算においては, 最低次のプロセスに対して, パートンが一つ多く放出されるプロセスの振幅を用意する必要があるが, これは一般に複雑な赤外発散を持つ。この赤外発散を系統的に分離し, パートン分布関数及びループ振幅と整合的に結合させる必要がある。また, 実験的に観測可能(定義可能)な「ジェット」とも, 整合性の取れた方法である必要がある。この問題に関して, 単純な場合(ドレル・ヤン及び, 深非弾性散乱プロセス)について, 「主対数項の引き算法」を開発し, ドレル・ヤンプロセスに関して具体的な計算を行い, その有効性を示した。さらに, 始状態・終状態に, 複数のパートンが存在する場合の一般化を行った。

散乱断面積に対して, さらに高精度の理論的な予言を与えるには, 散乱振幅のうち大きな補正を与える部分を因子化(factorization)し, 全次数について足しあげる必要があるが, その方法の一つとして「次主要対数項」を含むパートンシャワー法(NLL-PS)の開発を行った。現在,

必要な計算がほぼ終了し、全体のシステムに組み込むための研究が進んでいる。

2-2 電弱理論における1ループ補正の自動計算

ヒッグス粒子は LHC 実験で発見されることが期待されるが、その詳細な性質は ILC 実験により検証されると期待される。このため当該研究では世界に先駆けヒッグス粒子が生成される主要な過程に関し電弱理論による 1-ループ補正計算を行った。

具体的には $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$ 、 $t\bar{t}H$ 、 ZHH 、 e^+e^-H 、 $\nu\bar{\nu}HH$ 等である。いずれも関与するファインマン図は千を超え、自動計算手法がなければ実現できない規模である。最初の3つの過程に関してはその後、ドイツ、中国による追計算が発表され、結果の一致を見ている。最後の 2 過程に関しては未だに他グループによる追計算はなされていないが、発表された結果は繰り込み依存しないこと、赤外発散を持たないこと、ゲージ不変性等の検証を行ってある。自動計算で重要なことはその計算の正当性を如何に検証するかであり、当該研究では主にその検証システムの構築に最も時間を費やした。以上の5つの過程の計算により、ヒッグス粒子の自己結合定数、湯川結合に関し実験データから詳細な情報が得られる準備が整ったと言える。

2-3 超対称性理論における1ループ計算の自動化

標準理論を越える理論として最も有力視されているものに、超対称性理論がある。これまでの衝突実験による精密実験から、軽いヒッグス粒子の存在が示唆されている。ミニマル超対称性理論は軽いヒッグス粒子を予言しており、また電弱及び、強い相互作用が高エネルギーにおいて結合定数が一致するためには標準理論では実現することができず、超対称性の仮定を置くことで一致を見ることができるとも知られている。更に重力を含む統一理論として有力視されている弦理論では、その低エネルギー状態では超対称性が必要となるなど、実験的、理論的にも標準理論を越えるものとして超対称性が自然界の基本法則として存在している可能性の追求が注目されている。

超対称性は、しかし、現在到達可能なエネルギー領域ではその存在は確認されておらず、従ってその対称性は壊れていると理解しなければならない。このため、現存する粒子に対応する超対称性粒子は高エネルギー領域に存在していることが予想され、LHC 実験や ILC 実験での新粒子の発見が期待されている。これら超対称性粒子は極めて不安定なため、ただちに崩壊し現存の粒子へと転換するため、反応後の観測される終状態の粒子数は多くなる。TEV 領域での実験で超対称性粒子が関与する反応過程は増大し、その理論の詳細を検証するための計算は膨大なものとなる。

さらに理論の詳細な検証には 1-ループ計算が不可欠である。そのためには繰り込み処方
の確立が必要であるがこれまでは反応過程に依存する処方が使われていた。しかし精密計算
のためには理論全体を統括する繰り込み処方の確立が急務であった。当該研究では統一され
た質量殻繰り込み処方を提案し、これに基づく自動計算システムの構築を行った。

同時にゲージ不変性を用いる内部検証を行うために、一般化された非線形ゲージ項を導入し
た。しばしば繰り込み処方がゲージ不変であるかが問題となるが、この非線形ゲージ項による
検証により、繰り込み処方の判定が行えるようになった。例えばしばしば2つのヒッグスの真空
期待値の繰り込み定数を等しくとる条件が課されることがあるが、これは非線形ゲージ項による
ゲージ不変性を壊すことを確認し、この条件を課してはいけないことが判明できた。

当該研究では 1 体→2 体の崩壊過程、2 体→2 体の散乱過程の主要なものの 1-ループ計算
を行った。一般に標準理論と同じ反応過程に対し、超対称性理論では関与するファインマン
図はほぼ 10 倍に膨れあがる。このため、2 体→3 体、2 体→4 体の散乱過程の 1-ループ計算
には大型シミュレーション研究の適用が不可欠であり、今後の課題である。

3 平成17年度の実施報告

本グループでは、ファインマン振幅を自動的に計算するシステムGRACEを開発しており、標準
模型における 1 ループの自動計算が完成した。これまで、将来のリニアコライダーにおける湯
川結合やヒッグス自己結合の強さなどを測定するための重要な素粒子反応過程である、
 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ 、 $e^+e^- \rightarrow ZHH$ 、 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-H$ を前年度までにスカラ計算機でおこなって
研究成果を公表してきたところである。現在までに $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}HH$ の計算を完了した。より時
間のかかる LEP-IIでの $e^+e^- \rightarrow \mu\nu_\mu\bar{u}d$ という1ループの完全計算を準備している。また、5点、
6点の数式処理において、桁落ちが発生することがわかり、アルゴリズムを完成させた。この問
題のため、平成17年度はスーパーコンピュータ上での実行はできなかった。また、2→4プロ
セスにおける行列要素のベクトル化の効率化を行い、3. 14GFLOPSまで実行性能を確認した。
今後もプログラム開発を進めていく。

また、QCDループ・プロセス(QCD-NLO)を含むイベントジェネレータを作成するための基本
的なツールの開発を行った。ループを含む散乱振幅の自動計算を、GRACEを改良すること
により行う。ループ積分は、すべて超幾何関数で表現しそれを数値計算する方法を開発してい
るが、実際に超幾何関数を数値化し積分を行うプログラムの開発を行った。

4 口頭発表、発表論文、国際会議のプロシーディング論文等

4-1 論文リスト

- A QED shower including the next-to-leading logarithm corrections in e^+e^- annihilation, T. Munehisa, J. Fujimoto, Y. Kurihara, Y. Shimizu, *Prog. Theor. Phys.* **103**(2000),587-612.
- QED radiative correction for the single-W production using a parton shower method, Y. Kurihara, J. Fujimoto, T. Ishikawa, Y. Shimizu, K. Kato, K. Tobimatsu, T. Munehisa, *The European Physical Journal* **C20**(2001)253-258.
- QCD event generators with next-to-leading order matrix-elements and parton showers, Y. Kurihara, J. Fujimoto, T. Ishikawa, K. Kato, S. Kawabata, T. Munehisa, H. Tanaka *Nucl. Phys.* **B654**(2003) 301-319.
- GR@PPA_4b: A four bottom quark production event generator for $pp/p\bar{p}$ collisions, S. Tsuno, K. Sato, J. Fujimoto, T. Ishikawa, Y. Kurihara, S. Odaka, Y. Takaiwa and T. Abe, *Comput. Phys. Commun.* **151**(2003) 216-240
- GRACE/SUSY: Automatic generation of tree amplitudes in the minimal supersymmetric standard model, J. Fujimoto *et al.* *Comput. Phys. Commun.* **153** (2003) 106
- Full $O(\alpha)$ corrections to $e^+e^- \rightarrow \nu \text{ anti-}\nu H$ by GRACE, G. Belanger, F. Boudjema, J. Fujimoto, T. Ishikawa, T. Kaneko, K. Kato and Y. Shimizu, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **116** (2003) 353
- Full one-loop electroweak radiative corrections to single Higgs production in e^+e^- , G. Belanger, F. Boudjema, J. Fujimoto, T. Ishikawa, T. Kaneko, K. Kato and Y. Shimizu, *Phys. Lett.* **B559** (2003) 252
- Full $O(\alpha)$ electroweak and $O(\alpha(s))$ corrections to $e^+e^- \rightarrow t \text{ anti-}t, H$, G. Belanger *et al.*, *Phys. Lett.* **B571** (2003) 163
- Full $O(\alpha)$ electroweak corrections to double Higgs-strahlung at the linear collider, G. Belanger *et al.*, *Phys. Lett.* **B576** (2003) 152
- Automatic one-loop calculation of MSSM processes with GRACE, J. Fujimoto, T. Ishikawa, M. Jimbo, T. Kon and M. Kuroda, *Nucl. Instrum. Meth.* **A534** (2004) 246
- Full one-loop electroweak radiative corrections to single photon production in e^+e^- , F. Boudjema *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A 534** (2004) 334
- Electroweak corrections to Higgs production through $Z Z$ fusion at the linear collider, F. Boudjema *et al.*, *Phys. Lett. B* **{bf 600}** (2004) 65
- Loop integration results using numerical extrapolation for a non-scalar integral, E. de Doncker (Western Michigan U.), Y. Shimizu, J. Fujimoto, F. Yuasa (KEK,

Tsukuba), K. Kaugars, L. Cucos, J. Van Voorst (Western Michigan U.) *Nuclear Instruments Methods in Physics Research A* **534**(2004) 269–273

- Computation of loop integrals using extrapolation, E. de Doncker (Western Michigan U.), Y. Shimizu, J. Fujimoto, F. Yuasa (KEK, Tsukuba) *Comput.Phys.Commun.* **159** (2004) 145–156
- “Les Houches Guidebook to Monte Carlo Generators for Hadron Collider Physics”, M.A. Dobbs et al., *hep-ph/0403045*

4-2 博士論文・修士論文

博士論文:

Soushi Tsuno, Tests of Enhanced Leading Order QCD in W Boson plus Jet Production in 1.96-Tev Proton-Antiproton Collision, January 2004, Univ. of Tsukuba

4-3 国際会議での発表リスト

- Y. Kurihara: Matching between matrix elements and parton showers using a leading log subtraction method in NLO QCD, “Les Houches workshop”, at Les Houches, France, May 2003.
- Y. Kurihara: NLO event generator for LHC, “Physics Simulation for LHC”, KEK, Japan, Apr. 2004.
- 栗原良将: 「自動計算システム GRACE—その歴史と展望—」物質の創世と発展、日光、2004年11月
- Y. Kurihara: Automatic calculation of NLO-QCD cross sections with GRACE “Physics in the LHC-era” Kyoto, Japan, Dec. 2004.